

1) Anderson, J.G., D.W. Tooney and W.H. Brune, *Free radicals within the Antarctic vortex: The role of CFCs in Antarctic ozone loss*. Science, **251**, 39, (1991).

2) Austin, J., N. Butchart and K.P. Shine, *Possibility of an Arctic ozone hole in a doubled-CO₂ climate*. Nature, **360**, 221-225, (1992).

3) Cisneros, J.M., *El cambio planetario en la Meteorología y las Ciencias de la Atmósfera*. VII Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica, San Fernando, 2-5 dic., 1991. Bol. R.O.A., No. 6/92.

4) McElroy, M.B., R.J. Salawitch, S.C. Wofsy and J.A. Logan, *Antarctic ozone reductions due to synergistic interactions of chlorine and bromine*. Nature, **321**, 759, (1986).

5) Molina, L.T. and M.J. Molina, *Production of Cl₂O₂ from the self-reaction of the radical*. J. Phys. Chem., **91**, 433, (1987).

6) Molina, M.J., A.J. Colussi, L.T. Molina, R.N. Schindler and T.-L. Tso, *Quantum yield of chlorine-atom formation in the photodissociation of chlorine peroxide (ClOOCl) at 308 nm*. Chem. Phys. Lett., **173**, 310, (1990).

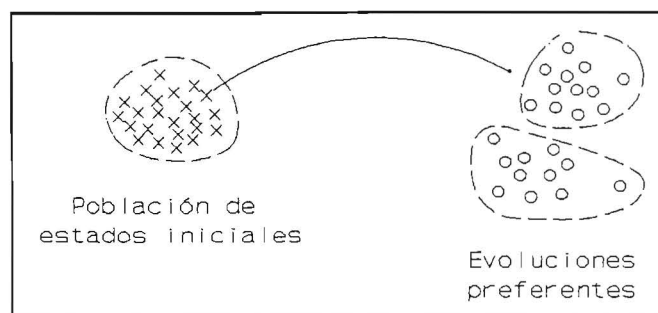
7) Molina, M.J. and M.S. Rowland, *Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom catalyzed destruction of ozone*. Nature, **249**, 810-814, (1974).

LA PREDECIBILIDAD DEL TIEMPO YA ES OPERATIVA

La predicción del tiempo, tanto si se realiza utilizando métodos empíricos o bien resolviendo el problema de valores iniciales de las ecuaciones que rigen la evolución atmosférica, está sometida a grandes fluctuaciones en cuanto a sus éxitos. Todos estamos familiarizados con el hecho de que empleando los mismos métodos y los mismos modelos numéricos podemos obtener una predicción excepcionalmente precisa en el corto plazo o una predicción tan inexacta que sea completamente inútil. ¿A qué se debe esta **variabilidad tan alta de la calidad de las predicciones**? ¿**Cuándo un estado de la atmósfera se deja predecir bien**?, o lo que es lo mismo, ¿cuándo es muy predecible? ¿Depende solamente del estado de la atmósfera o la predecibilidad está ligada al modelo que utilizemos para hacer las predicciones? Para tratar de dar respuesta a todas estas preguntas se va abriendo paso en la comunidad de meteorólogos numéricos una nueva disciplina: la **predecibilidad**. La finalidad última de esta disciplina es eminentemente práctica, a saber, asignar a cada predicción - realizada mediante un modelo numérico - un índice de calidad y a ser posible presentar predicciones alternativas con su correspondiente probabilidad.

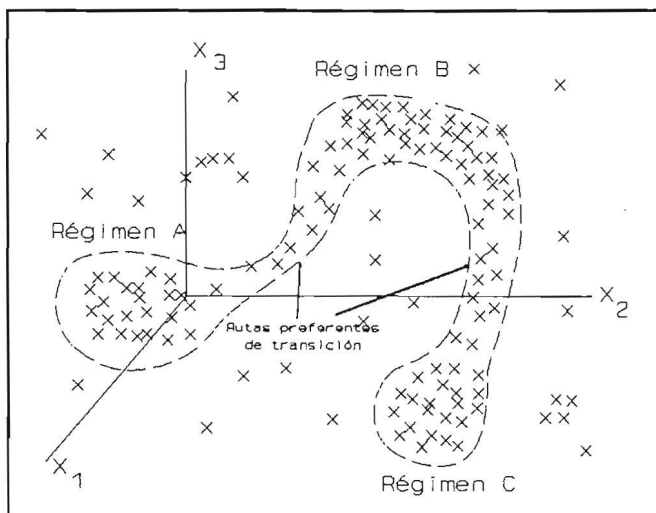
En primer lugar, las causas de este comportamiento tan aparentemente errático tenemos que buscarlas en la atmósfera misma, **la atmósfera es un sistema dinámico caótico** cuya evolución depende críticamente de las condiciones iniciales. Los sistemas caóticos se caracterizan por lo altamente variable que es su predecibilidad, estando esta predecibilidad muy

determinada por las condiciones iniciales. Esto se traduce en que pequeñas variaciones en el estado inicial, incluso inferiores al umbral de los errores de observación, pueden dar lugar a evoluciones posteriores claramente divergentes. Y es esta característica de la atmósfera, que aparece también simulada mediante los modelos numéricos, la que se utiliza para estimar el grado de predecibilidad del estado futuro de la atmósfera. El



procedimiento utilizado operativamente consiste en considerar una **población de estados iniciales** "próximos" al estado inicial de control y hacerlos evolucionar observando si las distintas evoluciones divergen en mayor o menor medida o si presentan una varias vías preferenciales de evolución. Una mayor divergencia en la evolución de las poblaciones se asocia a una menor predecibilidad.

En los últimos años se han venido estudiando



las ecuaciones diferenciales no lineales desde la óptica de la **teoría de los sistemas dinámicos** insistiendo en los aspectos geométricos y topológicos de las soluciones de las ecuaciones. La teoría de los sistemas dinámicos presenta una visión muy sugerente de los estados representados como puntos en el espacio de fases y las evoluciones como trayectorias en dicho espacio. La no linealidad de las ecuaciones abre perspectivas muy complejas para la estructura de las soluciones, presentándose atractores o subconjuntos del espacio de fases que engloban a estados preferentes alrededor de los cuales se mueven las distintas soluciones del sistema. Estas zonas del espacio de fases hacia las que el sistema está atraído y alrededor de las cuales gira la evolución temporal del sistema pueden tener una estructura muy compleja, como en el caso de los "atractores anómalos" cuyos intentos de descripción y/o clasificación están en una fase muy incipiente.

La atmósfera responde muy bien a este esquema de comportamiento surgido de la teoría de los sistemas dinámicos. Un estado de la atmósfera en un instante dado se representa por un punto en el espacio de fases constituido por todas las variables del sistema, la evolución se representa por una trayectoria, los regímenes, o estados en los que la atmósfera se encuentra preferentemente (estados de bloqueo, de marcado flujo zonal, etc.), quedan representados por los atractores del sistema. Podemos decir que la atmósfera tienen tendencia a adoptar determinados regímenes y a evolucionar entre diferentes regímenes mediante vías preferentes.

El algoritmo que estima la predecibilidad de un estado de la atmósfera, tal y como está operativo en el ECMWF y en el NMC de Washington, realiza un seguimiento de la evolución de una nube de estados iniciales (actualmente de varias decenas de puntos, dependiendo de la capacidad disponible de cálculo) alrededor de un estado inicial de control con el fin de determinar si todos ellos siguen trayectorias más menos

próximas, es decir si se mueven en la órbita del mismo atractor, o si se bifurcan en las órbitas de varios atractores. En este último caso tendríamos de una predicción alternativa a la de control con una probabilidad no nula de que tuviese lugar.

Constituye un desafío para los actuales modelos numéricos poder **simular la estructura de atractores de la atmósfera real**, máxime cuando nos enfrentamos a un sistema de un gran número de dimensiones que viene simulado por un sistema de ecuaciones que posee una gran inestabilidad estructural, es decir, que la estructura topológica de las soluciones puede cambiar radicalmente haciendo muy pequeños cambios en los términos de menor orden de las ecuaciones, cambios que son comparables a los que se realizan cuando se elige una parametrización de un fenómeno subrejilla entre varias posibles. De hecho se sabe las parametrizaciones de un modelo numérico condicionan de forma muy importante la estructura de los atractores, representada por la imagen anterior de regímenes y de vías de transición preferentes.

Se ha iniciado, pues, un camino conceptualmente más complejo que la simple predicción del estado futuro de la atmósfera mediante modelos numéricos. A partir de ahora se intentará también cuantificar la "bondad" de la predicción realizada y se propondrán predicciones alternativas. Como hemos esbozado más arriba la predecibilidad aparece muy ligada con el estudio de los estados preferentes de la atmósfera, o regímenes, y con las vías de transición entre regímenes. En definitiva, parece que el estudio de la predecibilidad va a venir cada vez más influido por consideraciones sobre los atractores del sistema atmosférico y sobre la estructura topológica de las soluciones de las ecuaciones que rigen el comportamiento de la atmósfera.

E. Rodríguez Camino